Experimentelle Untersuchung der Fluid-Struktur-Kopplung eines Systems aus CFK-Struktur und quaderförmiger Kavität

Thomas Roloff[1], Bernd-Christian Hölscher[1], Malte Misol[2], Michael Sinapius[1]

[1] *Technische Universität Braunschweig, Institut für Adaptronik und Funktionsintegration, 38106 Braunschweig*

E-Mail: thomas.roloff@tu-braunschweig.de

[2] *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, 38108 Braunschweig*

Einleitung

Dünnwandige Strukturen bieten erhebliches Leichtbaupotential bei der Konstruktion verschiedenster Bauteile. In diesem Zuge finden kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) oftmals Anwendung, neigen jedoch zu Vibrationen im niedrigeren Frequenzbereich, die zu einer ungewollten Schallabstrahlung führen können. Aktive Systeme eignen sich zur tieffrequenten Beruhigung von Strukturschwingungen und Minderung der vibroakustischen Schallabstrahlung. Zur Beschreibung des gekoppelten Systemverhaltens einer dünnwandigen Struktur mit angrenzender Kavität sind Kenntnisse über die Fluid-Struktur-Kopplung notwendig. Die Annahme schwacher Kopplung zwischen Fluid und Struktur ist Voraussetzung vieler Ansätze zur Minderung der Schalleinstrahlung in Kavitäten (bspw. [1], [2], [3]).

In diesem Beitrag wird anhand einer generischen Geometrie die Interaktion zwischen einer rechteckförmigen Struktur aus CFK und einer angrenzenden quaderförmigen Kavität im Frequenzbereich bis 500 Hz experimentell untersucht. Die untersuchte CFK-Platte hat die Abmessungen $800 \times 600 \times 3{,}4$ mm^3 (B×H×T) und besitzt eine akustisch relevante Anisotropie der Steifigkeit in Form eines überwiegend unidirektionalen Lagenaufbaus. Der Prüfstand ermöglicht die Montage der Platte vor einer Kavität mit den Innenmaßen $810 \times 607{,}5 \times 407{,}5$ mm^3 (B×H×T). Aufgrund der Lagerung und Abmessungen der Platte entsteht ein umlaufender Spalt zur Kavitätsöffnung. Die im Folgenden präsentierten Untersuchungen dienen zur Untersuchung des Einflusses der Steifigkeitsanisotropie der Struktur sowie des Spaltes auf das dynamische Verhalten des gekoppelten Systems aus Kavität und Struktur. Dazu wird eine experimentelle Modalanalyse der Struktur zur Bestimmung des strukturdynamischen Verhaltens unter Berücksichtigung der angrenzenden Kavität sowie eine akustische Modalanalyse des Innenraumes zur Identifikation des akustischen Verhaltens unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführt.

Vorstellung des Prüfstands

Der verwendete Prüfstand besteht im Wesentlichen aus einer aus Holz gefertigten Box, die als akustische Kavität dient und in Abb. 1 gezeigt ist. Die Box ist doppelwandig konstruiert und der Zwischenraum mit Dämmwolle ausgelegt, sodass die Wände möglichst schallhart und schallisoliert sind. Die Rückwand ist gleichermaßen aufgebaut, als Tür konstruiert, sodass der Prüfstand geöffnet werden kann und mit sechs Lautsprechern zur akustischen Anregung versehen. Mithilfe von Gummipuffern ist der Prüfstand von der Prüfumgebung entkoppelt. An der Vorderseite ist der Prüfstand offen. Hier kann eine schallharte Berandungsplatte oder eine schwingfähige Struktur montiert werden, um die Schallabstrahlung in den Innenraum zu untersuchen. Zur Ermittlung des Einflusses anisotropen Materialverhaltens auf das Verhalten des Fluid-Struktur-Systems soll neben der Platte aus CFK eine 3 mm dicke Referenzplatte aus Aluminium im Frequenzbereich bis 500 Hz untersucht werden. Die untersuchte Platte aus CFK ist so ausgelegt, dass sie eine akustisch relevante Anisotropie der Steifigkeit aufweist, was über den im untersuchten Frequenzbereich maximal auftretenden modalen Index beschrieben wird. Der modale Index beschreibt dabei die Anzahl der Knotenlinien einer Eigenform je Raumrichtung. Es wird eine analytische Betrachtung des dynamischen Verhaltens der Kavität durchgeführt und der Lagenaufbau der CFK-Platte so ausgewählt, dass sie im betrachteten Frequenzbereich in eine Raumrichtung einen nahezu identischen auftretenden maximalen modalen Index wie die Kavität aufweist und in die andere Raumrichtung einen möglichst unterschiedlichen. Dadurch kann in weiteren Untersuchungen ermittelt werden, welche der beiden Komponenten das Schalleinstrahlverhalten dominiert. Es resultiert ein Lagenaufbau von 13 unidirektionalen Lagen aus HexPly M21/35%/268/T800S mit 12 Lagen in Breitenrichtung und einer Mittellage in Höhenrichtung.

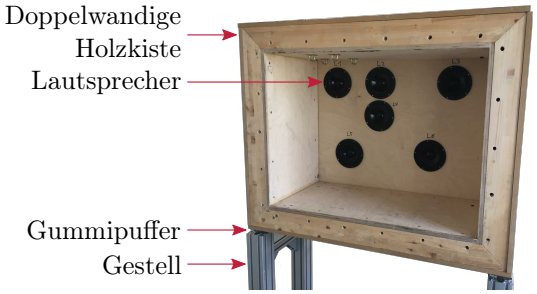


Abbildung 1: Grundkonstruktion des Prüfstands, auf Basis derer Modifikationen zur Untersuchung einer davor platzierbaren Platte und der akustischen Kavität vorgenommen werden.

Im Folgenden wird der Aufbau zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens der Struktur bzw. des akustischen Verhaltens der Kavität vorgestellt.

Aufbau zur strukturellen Modalanalyse

Zur Durchführung der experimentellen Modalanalyse werden die beiden untersuchten Platten aus CFK und Aluminium mittels einer Aufhängung frei vor der Kavi-

tät gelagert. Der Versuchsaufbau ist Abb. 2 zu entnehmen. Die strukturelle Anregung erfolgt über einen Shaker, dessen Anregungssignal über einen Kraftsensor am Krafteinleitungspunkt aufgenommen wird. Die Anregung erfolgt in einem Eckpunkt der Platte, da sich dort bei der gewählten Lagerung der maximale Steuerbarkeitsindex ergibt (vgl. [4]). Als Eingangssignal wird ein phasenoptimierter Multisinus verwendet (vgl. [5]). Ein Laser-Scanning-Vibrometer (LSV) zeichnet die Strukturantworten an den in Abb. 3 zu erkennenden Messpunkten aus Retroreflektionsfolie auf. Aufgrund der Konstruktion der freien Lagerung entsteht umlaufend zwischen den Rändern der Platte sowie den Innenkanten der Kavität ein Spalt, der in Abb. 3 gezeigt ist. Der Aufbau zur akustischen Untersuchung des Systems wird im folgenden Abschnitt erklärt.

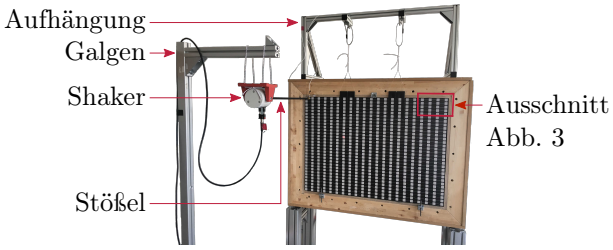


Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens der schwingfähigen Struktur mittels experimenteller Modalanalyse.

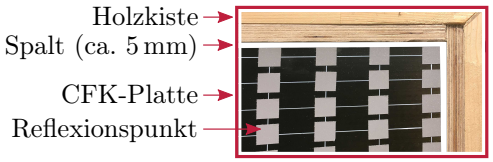


Abbildung 3: Ausschnitt des Aufbaus zur experimentellen Modalanalyse zur Darstellung des Spaltes zwischen der frei gelagerten Platte und der Kavität

Aufbau zur akustischen Modalanalyse

Zur Analyse des akustischen Verhaltens werden mehrere Messreihen durchgeführt. Zum einen wird die annähernd schallhart verschlossene Kavität untersucht, zum anderen wird die Kavität mit davor frei gelagerter Platte und entstehendem Spalt vermessen. Abb. 4 zeigt den Versuchsaufbau zur Untersuchung der annähernd schallharten Kavität. Zur Untersuchung des gekoppelten Systems wird lediglich die fest verspannte schallharte Berandungsplatte durch die frei gelagerte CFK- bzw. Aluminiumplatte ersetzt. Die akustische Anregung erfolgt über mehrere Lautsprecher in der Rückwand, deren Anregungssignal über Beschleunigungssensoren auf den Membranoberflächen aufgezeichnet wird, um die akustischen Eigenfrequenzen und Eigenformen zu bestimmen [6]. Das akustische Antwortverhalten wird über ein Mikrofonarray mit 5×6 Mikrofonen an zwölf Positionen in Breitenrichtung der Kavität gemessen, um mindestens sechs Messpunkte pro erwarteter Wellenlänge zu verwenden. Der schallharte Abschluss an der Vorderseite wird mittels einer 10 mm dicken Plexiglasplatte realisiert. Eine Untersuchung ihres strukturellen Verhaltens bestätigt die Annahme einer schallharten Berandung. Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen vorgestellt.

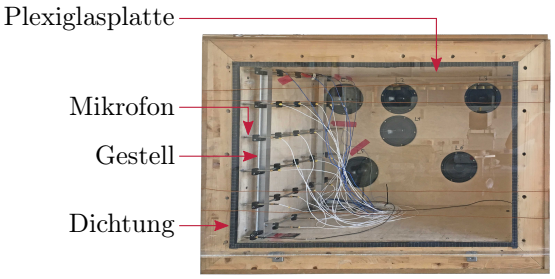


Abbildung 4: Aufbau zur Ermittlung des akustischen Verhaltens der schallharten Kavität

Dynamisches Verhalten der Struktur

Eine Linearitätsuntersuchung der untersuchten Strukturen validiert die Annahme linearen Strukturverhaltens im betrachteten Frequenz- und Amplitudenbereich. Abb. 5 und Abb. 6 zeigen die kollokal ermittelten Amplituden- $|H|(f)$ und Phasenverläufe $\varphi(f)$ der beiden Platten jeweils mit geöffneter bzw. geschlossener Tür der Prüfkavität, um den Einfluss des akustischen Innenraumes auf das strukturdynamische Verhalten zu ermitteln. Es zeigt sich, dass die beiden Platten aufgrund ihrer unterschiedlichen Materialparameter unterschiedliches Strukturverhalten aufweisen. Zudem ist deutlich zu erkennen, dass die Existenz der angrenzenden Kavität in diesem Fall keinen Einfluss auf das dynamische Verhalten der Struktur hat, da die gemessenen Übertragungsfunktionen nahezu identisch für beide Konfigurationen sind. Ein Vergleich der jeweils ermittelten ersten Eigenformen der Platten mit den numerisch zu erwartenden über das MAC-Kriterium liefert Werte über 0,9, weshalb davon ausgegangen wird, dass die freie Lagerung ausreichend realisiert ist.

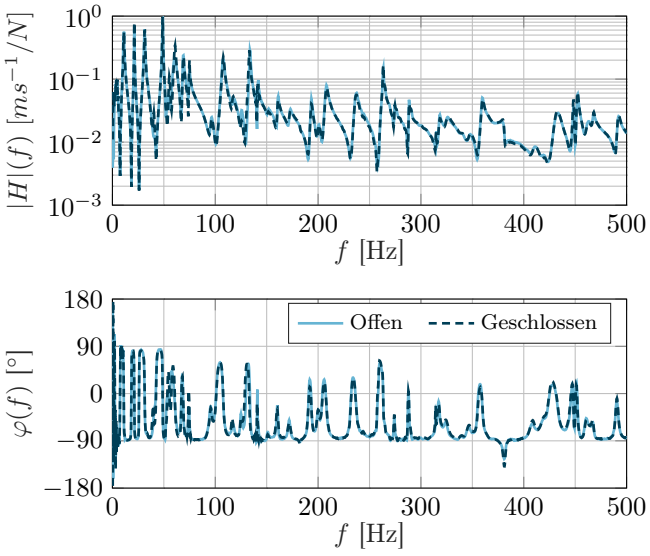


Abbildung 5: Kollokal gemessene Übertragungsfunktion der CFK-Platte mit geöffneter und geschlossener Kavität

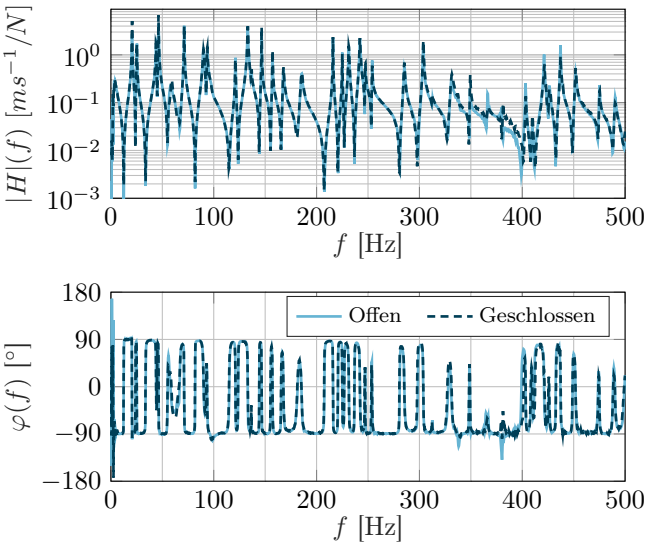


Abbildung 6: Kollokal gemessene Übertragungsfunktion der Aluminiumplatte mit geöffneter und geschlossener Kavität

Dynamisches Verhalten der Kavität

Auch die akustische Linearitätsuntersuchung der Kavität bestätigt die Annahme linearen Systemverhaltens bei den verwendeten Frequenzen und Amplituden für die drei Konfigurationen des Testaufbaus.

Die Ergebnisse zur als schallhart angenommenen Kavität stimmen gut mit der Analytik überein. Tab. 1 zeigt die analytisch und experimentell ermittelten akustischen Eigenfrequenzen $f_{F,analyt}$ bzw. $f_{F,exp}$ mit den zugehörigen Eigenformen, die mittels ihrer modalen Indizes (l_F, m_F, n_F) (B×H×T) angegeben werden. Die Identifikation der Raummoden erfolgt unter Verwendung des *RFP-Z*-Algorithmus (vgl. [7]). Die Anregung mit mehreren Lautsprechern ermöglicht die Trennung von Eigenformen mit nahe beieinander liegenden Eigenfrequenzen. Bei der Untersuchung der Kavität mit davor frei gelagerter Platte wird erwartet, dass sich die Eigenfrequenzen aufgrund der gleichbleibenden Abmessungen nicht maßgeblich verschieben und sich die Dämpfung aufgrund des Spaltes erhöht. Abb. 7 zeigt den Vergleich der über alle Mikrofonmessungen gemittelten Amplitudengänge für die schallharte Kavität und das System mit davor frei gelagerter Platte. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich die Peaks des Amplitudenganges gegenüber der schallharten Kavität zu höheren Frequenzen verschieben. Zudem treten in den Bereichen 210-265 Hz, 300-330 Hz sowie 440-465 Hz mehr ausgeprägte Peaks als bei der schallharten Kavität auf. Die zugehörigen Frequenzen sind ebenfalls Tab. 1 zu entnehmen. Die Werte des Systems mit verwendeter Aluminiumplatte ähneln den Werten des Systems mit CFK-Platte sehr und werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht explizit aufgeführt. Abb. 7 verdeutlicht, dass die Plattendynamik keinen erkennbaren Einfluss auf das akustische Verhalten dieses Systems hat, da sich die Amplitudengänge beider Konfigurationen nahezu nicht unterscheiden. Die möglichen Eigenformen sind laut der *modal phase collinearity* durchweg reellwertig, was gegen die Ausbildung maßgeblicher, konzentrierter Dämpfung aufgrund des umlaufenden Spalts spricht.

Tabelle 1: Analytisch und experimentell ermittelte, akustische Eigenfrequenzen und Eigenformen der schallharten Kavität und experimentell bestimmte Betriebsschwingformen der Konfiguration: CFK-Platte mit angrenzender Kavität

Mode	Schallhart		CFK
l_F, m_F, n_F	$f_{F,analyt}$	$f_{F,exp}$	$f_{F,exp}$
[-]	[Hz]	[Hz]	[Hz]
(0,0,0)	0,00	-	-
(1,0,0)	211,73	213,62	214,16’ 239,29’ 261,89’
(0,1,0)	282,30	291,91	303,72’ 326,22’
(1,1,0)	352,88	370,23	385,28
(0,0,1)	420,86	430,45	-
(2,0,0)	423,46	435,65	-
			443,31” 462,52”
(1,0,1)	471,12	484,20	513,66

’) Gleiche Betriebsschwingform tritt bei mehreren Frequenzen auf.

”) Ermittelte Eigenformen entsprechen nicht den Eigenformen der schallharten Kavität.

Bei den Peaks in den ersten beiden Frequenzbereichen werden drei bzw. zwei nahezu identische akustische Schwingformen ermittelt. Abb. 8 zeigt exemplarisch die analytisch erwartete (1,0,0)-Eigenform der schallharten Kavität bei f=211,73 Hz im Vergleich zu den drei bei den Peaks des Amplitudengangs auftretenden Betriebsschwingformen. Dabei ist der Betrag der Schwingamplitude $|\hat{\Phi}|$ normiert auf den Maximalwert aufgetragen. Vergleicht man diese drei über das MAC-Kriterium, ergibt sich, dass sie stark korreliert sind. Dies widerspricht jedoch den Annahmen der modalen Beschreibung eines schwingungstechnischen Systems. Es wird vermutet, dass eine Verletzung der Beobachtbarkeit auftritt und beispielsweise im Bereich des Spaltes eine nicht identifizierte Änderung der Randbedingungen auftritt.

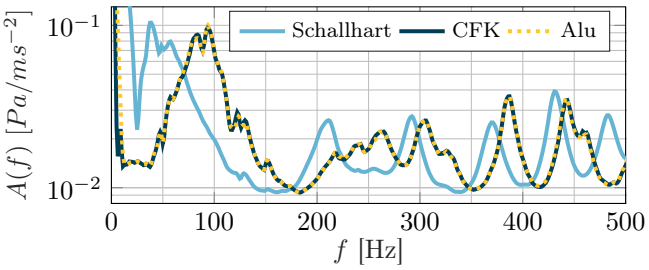
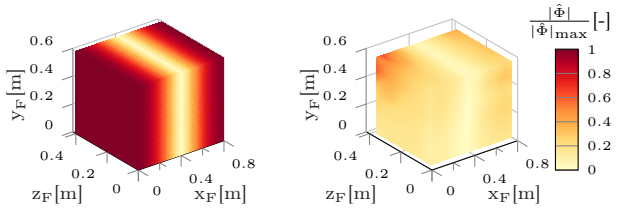


Abbildung 7: Vergleich der über alle Mikrofonmessungen gemittelten Amplitudengänge für schallharte Kavität und das System mit davor gelagerter Platte und Spalt (vgl. Abb. 3)

Bei den separat auftretenden Peaks zwischen 440 und 465 Hz werden akustische Eigenformen ermittelt, die in ihrer Amplitudenverteilung keiner der Eigenformen des schallharten Systems entsprechen. Abb. 9 zeigt die experimentell ermittelten akustischen Eigenformen der zugehörigen Peaks. Eine erste Vermutung der Überlagerung



(a) Analytische Eigenform Schallhart, f=211,73 Hz

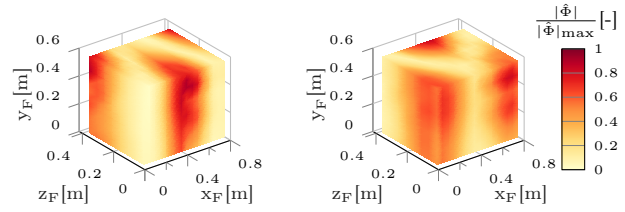
(b) Betriebsschwingform mit CFK-Platte, f=214,16 Hz

(c) Betriebsschwingform mit CFK-Platte, f=239,29 Hz

(d) Betriebsschwingform mit CFK-Platte, f=261,89 Hz

Abbildung 8: Vergleich von analytischer Eigenform der schallharten Kavität und experimentell ähnlichen Betriebsschwingformen des Systems mit CFK-Platte (Betragsdarstellung normiert auf Maximalwert)

der (0,0,1)- und (2,0,0)-Eigenform der schallharten Kavität kann nicht bestätigt werden. Es wird daher vermutet, dass sich die Abweichungen der Eigenformen aufgrund der Unterschiede des Versuchsaufbaus zur schallharten Kavität ergeben. Die Plattendynamik hat keinen Einfluss auf das akustische Verhalten, der nicht schallharte Spalt hat jedoch vermutlich einen entscheidenden Einfluss. Kenntnis über die akustischen Raummoden ist allerdings grundlegende Voraussetzung für Regelungsansätze zur Minderung der Schalleinstrahlung wie bspw. bei Hesse et al. [2].



(a) Exp. Eigenform mit CFK-Platte, f=443,31 Hz

(b) Exp. Eigenform mit CFK-Platte, f=462,52 Hz

Abbildung 9: Exp. Eigenformen der Kavität mit CFK-Platte davor, die von denen der schallharten Kavität abweichen (Betragsdarstellung normiert auf Maximalwert)

Als mögliche Ursachen der auftretenden, von den Eigenformen der schallharten Kavität abweichenden, Eigenformen werden neben der bereits auszuschließenden Plattendynamik, der Einfluss der Prüfstandsdynamik, die Auswirkungen des entstehenden Spaltes sowie die Verletzung der Beobachtbarkeit identifiziert. Ein weiterer Versuch, bei dem eine schallharte Platte unter Abdichtung des Spaltes frei hängend vor der Kavität platziert wird, ergibt nahezu identische Ergebnisse im Vergleich zum System mit fest verspannter, schallharter Platte. Es wird daraus geschlossen, dass die Prüfstandsdynamik keinen maßgeblichen Einfluss auf das akustische Verhalten der Kavität hat. Zudem legt dies nahe, dass der umlaufende Spalt aufgrund der Änderung der Randbedingungen von einer schallharten zu einer schallweichen Berandung einen bedeutenden Einfluss auf die Ausbildung der akustischen Raummoden des gekoppelten Systems hat. Diese Erkenntnis gilt es in weiteren Untersuchungen zu überprüfen.

Zusammenfassung und Ausblick

Die strukturdynamischen Untersuchungen ergeben lineares Verhalten der CFK- bzw. Aluminiumplatte bei struktureller Anregung und zeigen, dass die Strukturdynamik unabhängig von der angrenzenden Kavität ist.
Die akustischen Untersuchungen zeigen ebenfalls lineares Verhalten der Kavität, liefern jedoch keine eindeutige Aussage zur Kopplung zwischen Kavität und Struktur. Zwar hat die Plattendynamik keinen Einfluss auf das akustische Verhalten der Kavität, es treten jedoch einige noch nicht zu erklärende Phänomene bei der Betrachtung der Kavität mit frei davor gelagerter Platte auf. Demnach werden weitere Untersuchungen benötigt.
Eine numerische Simulation der nicht vollständig rechtwinkligen Kavität mit den realen Abmessungen sowie Konfigurationen mit und ohne Spalt könnte weitere Erkenntnisse zur Entstehung der unerwarteten Phänomene liefern. Außerdem könnte eine Linearitätsuntersuchung der Kavität in der Nähe des Spaltes überprüfen, ob auch in diesem Bereich lineares Verhalten auftritt, das Grundlage für die Systembeschreibung in linearen Modellen ist.

Danksagung

Diese Arbeit wurde durch die DFG im Rahmen des Projektes „Aktive Schalleinstrahlungsminderung in Innenräume“ gefördert.

Literatur

[1] B. S. Cazzolato und C. H. Hansen. “Active control of sound transmission using structural error sensing”. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 104 (1998), S. 2878–2889.

[2] C. Hesse, V. Papantoni, S. Algermissen und H. P. Monner. “Frequency-independent radiation modes of interior sound radiation: Experimental study and global active control”. In: *Journal of Sound and Vibration* 401 (2017), S. 204–213.

[3] S.-M. Kim und M. J. Brennan. “Active control of harmonic sound transmission into an acoustic enclosure using both structural and acoustic actuators”. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 107 (2000), S. 2523–2534.

[4] J. M. Sinapius. *Adaptronik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018.

[5] Polytec GmbH, Hrsg. *Software-Handbuch - Polytec Scanning Vibrometer PSV*. 2015.

[6] P. Sas und F. Augusztinovicz. “Acoustic Modal Analysis”. In: *Modal Analysis and Testing*. Hrsg. von J. M. M. Silva und N. M. M. Maia. Bd. 14. Dordrecht: Springer Netherlands, 1999, S. 487–506.

[7] S. Chauhan, R. Martell, R. J. Allemang und D. L. Brown. *Implementation of Complex Frequency Mapping to Low Order Frequency Domain algorithm for Operational Modal Analysis*. 2007.